

BASE DE DADOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS –

Modelo HVDC-VSC

Versão: maio/2026

I. Descrição do modelo EMT da solução de referência VSC do Bipolo Nordeste II:

Com o objetivo de subsidiar os estudos e recomendações realizadas no relatório Estudo de Expansão das Interligações Regionais – Parte III [1], foi desenvolvido um modelo para o elo de corrente contínua (*High Voltage Direct Current* – HVDC), baseado na tecnologia VSC (*Voltage Source Converter*) em ambiente voltado para estudos de transitórios eletromagnéticos (EMT), no *software* PSCAD.

Este modelo tem como base o sistema *benchmark* HVDC-VSC disponível na base de conhecimentos do PSCAD [2], tendo este sido adaptado para os níveis de tensão e potência da solução de referência indicada (600 kV e 3000 MW). Foi adicionado, também, o modelo de linha de transmissão em corrente contínua recomendado para a solução de referência do projeto, em 600kV.

O principal objetivo da construção do modelo EMT foi verificar o comportamento do sistema HVDC frente a faltas no lado CC. Para isto, foram realizadas interações técnicas com múltiplos fabricantes a fim de refinar o desempenho do modelo para estes eventos e torná-lo compatível com a resposta esperada em soluções industriais. Como resultado dessas interações e das recomendações recebidas, foram adicionados os seguintes dispositivos, equipamentos de proteção e lógicas destinados ao tratamento de defeitos no elo CC, conforme descrito a seguir:

- Neutral Bus Switch (NBS) para interrupção da corrente de falta;
- Para-raios no lado CC;
- Capacitor de polo CC;
- Reator CA do conversor;
- Lógica para bloqueio do conversor, abertura dos disjuntores CA e do NBS na ocorrência de faltas CC;
- Lógica de religamento, reenergização e recuperação da potência transmitida pelo polo após falta CC.

Cabe destacar que os equipamentos e lógicas de proteção adicionados, bem como os valores de parâmetros utilizados no modelo, tiveram como propósito a obtenção de um modelo genérico, não sendo objeto da análise a otimização do projeto ou das dinâmicas apresentadas pelo modelo, o que deverá ocorrer na etapa de implantação do projeto. Desse modo, buscou-se apenas a obtenção, frente eventos na linha CC, de respostas representativas e que não indicassem risco aos equipamentos do sistema.

II. Descrição dos equivalentes de rede CA para modelo *Stand-Alone* em transmissão direta:

Visando obter maior representatividade da resposta transitória das redes CA nos estudos preliminares de integração, foi desenvolvido um equivalente de rede estático a partir do ponto de conexão das conversoras para análises do bipolo em configuração *stand-alone*. O cenário utilizado corresponde ao cenário 2 descrito na Seção 5.3.2 da versão 1 relatório Estudo de Expansão das Interligações Regionais – Parte III [1], consistindo em um cenário de Norte/Nordeste exportador, Sul importador e carga máxima diurna no ano de 2033.

Considerando os pontos de conexão do bipolo como ponto de partida para a expansão da rede, adotou-se como critério a expansão mínima de três vizinhanças ou 300 quilômetros de distância por linhas de transmissão. Caso a expansão alcançasse um barramento com tensão inferior a 500 kV, poderia ser interrompida na segunda vizinhança ou com distância de 300 quilômetros. No total, o sistema modelado possui em torno de 142 barras, 41 transformadores, mais de 111 linhas de transmissão, 95 compensadores *shunt*, 13 fontes de corrente representativas de *Inverter-Based Resources (IBRs)*, 9 compensadores séries e diversos equivalentes de transferências.

Como requisito de validação de curto-circuito, foi estabelecido o critério máximo de 8% para barra de conexão do bipolo, 10% para primeira vizinhança e 20% para segunda vizinhança, tanto para curtos trifásicos quanto monofásicos. A validação de fluxo de potência, em que se compara os módulos e ângulos das barras, utilizou os mesmos critérios de validação por vizinhança.

Por fim, cabe destacar que o equivalente de rede desenvolvido para análises em configuração *stand-alone* teve como foco a realização de algumas análises preliminares relacionadas a concepção e definição de requisitos do sistema HVDC VSC.

Para outras análises, como os estudos de *multi-infeed* e interação entre IBRs, onde é necessária a representação de modelos dinâmicos, — como os demais elos HVDC do SIN, máquinas, *IBRs*, compensadores estáticos e todos seus respectivos controladores, — é necessário a modelagem de uma rede mais ampla, com mais elementos e considerando expansões múltiplas a partir de todas as subestações conversoras. Esse equivalente de rede maior está em fase de desenvolvimento e será divulgado em uma próxima versão da Base de Dados.

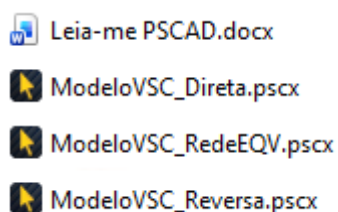
III. Organização da Base:

A base de dados de transitórios eletromagnéticos está organizada da seguinte forma:

- ModeloVSC_Direta.pscx
 - Arquivo PSCAD contendo o modelo HVDC-VSC configurado para transmissão de potência em fluxo direto conectado a fontes de thevenin.
- ModeloVSC_Reversa.pscx
 - Arquivo PSCAD contendo o modelo HVDC-VSC configurado para transmissão de potência em fluxo reverso conectado a fontes de thevenin.
- ModeloVSC_RedeEQV.pscx
 - Arquivo PSCAD contendo o modelo HVDC-VSC configurado para transmissão de potência em fluxo direto conectado ao equivalente de redes desenvolvido.

IV. Forma de Utilização para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos:

Para realização de estudos utilizando o modelo em PSCAD, é necessário apenas carregar o arquivo correspondente ao cenário de estudo desejado (Transmissão direta ou reversa). Os arquivos correspondentes se encontram na pasta principal:

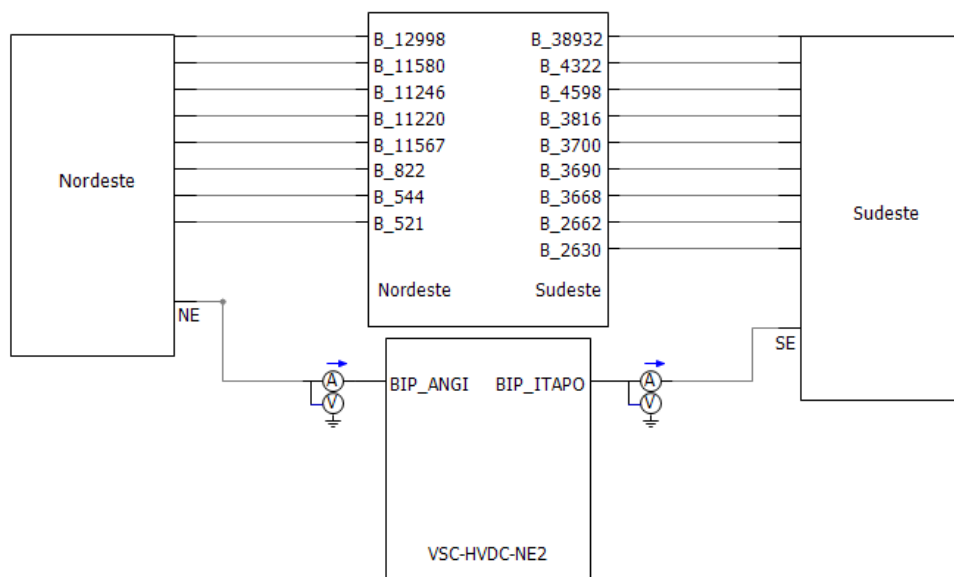


Uma vez carregado o arquivo com o modelo desejado, o sistema estará carregado e pronto para realizar simulações.

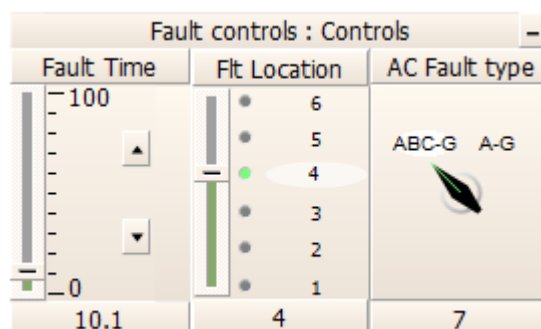
É importante destacar que o modelo foi desenvolvido e testado utilizando a versão 5.0.2 do PSCAD e compilado utilizando o compilador GFortran 4.6.2, tendo seu desempenho e

funcionamento verificado também utilizando o compilador Intel® Fortran Compiler Classic 2021.10.0. O uso de outras versões ou compiladores pode produzir erros e incompatibilidades não previstos durante o desenvolvimento.

Para o arquivo “ModeloVSC_RedeEQV.pscx”, o modelo do elo VSC-HVDC encontra-se dentro do bloco “VSC-HVDC-NE2”. Para os demais arquivos, o modelo se encontra na página principal da simulação.



Com o modelo carregado, é possível identificar na parte superior da tela um painel para seleção das diversas configurações de falta avaliadas:



O *slider* “*Fault Time*” permite escolher o instante de aplicação da falta, por padrão em 10.1 segundos. O parâmetro “*Flt Location*” permite escolher o ponto de aplicação da falta, da seguinte forma:





1. Sem falta
2. Falta CA no terminal 1 (Retificador)
3. Falta CC no terminal 1 (Retificador)

4. Falta CC no meio da linha CC
5. Falta CC no terminal 2 (Inversor)
6. Falta CA no terminal 2 (Inversor)

O Parâmetro "*AC Fault Type*" é relevante apenas para as configurações de falta 2 e 6, permitindo escolher se a falta CA é trifásica ou monofásica.

Abaixo do circuito de potência, encontra-se o bloco "*DC Fault Sequence*", contendo a lógica implementada para eliminação do defeito CC, religamento e recuperação do elo.

Nele, é encontrado mais um painel de controles:

DC_FAULT : FAULT			DC_FAULT : Controls
DC FAULT FLAG	DC Chopper	Damp Resistor	NBS CURRENT THRESHOLD
OFF ON 	OFF ON 	OFF ON 	 2.5 0.25 ▲ ▼
1	0	0	0.75

Neste, a variável "*DC FAULT FLAG*" é utilizada para habilitar (ON) ou desabilitar (OFF) a sequência de eventos de proteção do elo.

As outras duas variáveis, "*DC Chopper*" e "*Damp Resistor*" são utilizadas para habilitar (ON) ou desabilitar (OFF) o *chopper* CC e os resistores de amortecimento do elo CC, respectivamente. Recomendamos que estes sejam mantidos desabilitados para reprodução das curvas observadas no relatório.

A última variável, "*NBS CURRENT THRESHOLD*", é utilizada para selecionar o limiar de corrente, em kA, para ativação do NBS durante a faltas CC, tendo como valor máximo 2.5. Recomendamos para esta variável o valor de 0.75 kA para reprodução de desempenho satisfatório nos três casos de curto-circuito CC avaliados.

O bloco "TFR", localizado ao lado do "DC Fault Sequence", contém gráficos das principais grandezas do circuito, como tensão CA RMS, potência ativa e reativa nos terminais, tensões e correntes CC e corrente no NBS de cada terminal. Além disso, contém também o gráfico do estado lógico dos disjuntores, NBS e bloqueio dos conversores de cada um dos terminais para acompanhamento do processo de proteção e recomposição do sistema.

V. Contatos:

Em caso de dúvidas ou problemas com a utilização da base de dados, por favor, entrar em contato.

Thaís Pacheco Teixeira
thais.teixeira@epe.gov.br

Rodrigo Gomes Martins
rodrigo.martins@epe.gov.br

Gustavo Cezimbra Leal
gustavo.leal@epe.gov.br

Referências

- [1] EPE, “Estudo de Expansão das Interligações Regionais – Parte III: Expansão da Capacidade de Exportação da Região Nordeste e Importação da Região Sul - Análise Técnico-Econômica”, 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/estudos-de-planejamento>. [Acesso em fevereiro 2026].
- [2] Manitoba Hydro, “Modular Multi-Level Converter (MMC)”, 2015. [Online]. Disponível em: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/222>. [Acesso em fevereiro de 2026]